doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.020

# 耕地土壤有机质与全氮空间变异性对粒度的响应研究\*

陈 涛 常庆瑞 刘 钊 赵业婷 刘 京 (西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要:为有效揭示土壤空间变异性的尺度效应,为土壤采样设计提供科学依据,以黄土台塬区耕地土壤有机质(SOM)和全氮(STN)为例,利用空间自相关、半方差函数及分形维数分析了不同采样粒度条件下土壤属性的空间结构变化规律。结果表明,研究区耕地 SOM 和 STN 的平均质量比分别为 14.79 g/kg 和 0.78 g/kg;随采样粒度增大,SOM 变异系数基本未变,STN 则表现总体增加;其空间自相关性减弱,由随机因素所引起的空间变异性逐渐增强,导致结构变异比重趋于减小;SOM 和 STN 空间异质性随粒度的变化并非简单线性关系,而表现出先增后减的倒U 型变化。耕地 SOM 和 STN 的空间分布呈北高南低,SOM 含量总体中等偏下,而 STN 含量较低,耕作时应适当增加氮素补充。

关键词:土壤有机质 土壤全氮 采样粒度 空间变异性 中图分类号: \$151.9; \$159.2 文献标识码:A 文章编号: 1000-1298(2013)10-0122-08

# Spatial Variability Response of Farmland Soil Organic Matter and Total Nitrogen to Sampling Grain Size

Chen Tao Chang Qingrui Liu Zhao Zhao Yeting Liu Jing

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To effectively reveal scale effect of soil attributes and provide information for sampling design, the spatial variability response rules of soil organic matter and total nitrogen to sampling grain size were identified by spatial autocorrelation, semi-variogram and fractal dimension in Loess Plateau, China. The results showed that the average content of SOM and STN were 14. 79 g/kg and 0. 78 g/kg, respectively. With the sampling grain size increasing, the coefficient of variation of SOM had basically not changed, but that of STN showed a gradually elevated trend. In addition, the spatial autocorrelation of SOM and STN was weakened and their spatial variability from random factors became much stronger. Meanwhile, the relationship between spatial variability and sampling grain size was not linear, but a reverse "U" type changing trend. The spatial distribution of SOM and STN concentration exhibited higher in the north and lower in the south of study area. SOM content was at the mid-low level, but STN content was under the normal level which led to much more nitrogen needed in the future.

Key words: Soil organic matter Soil total nitrogen Sampling grain size Spatial variability

引言

土壤有机质(SOM)与全氮(STN)作为陆地生态 系统的必要组成部分,是全球碳、氮循环的重要源和 汇<sup>[1-2]</sup>。由于其高度异质性分布特征,对其进行空间变异分析已成为土壤学、环境学、生态学等领域的研究热点之一<sup>[3]</sup>。长期以来,许多学者在单一尺度 下围绕其空间变异性展开了大量研究,取得丰富成

通讯作者:常庆瑞,教授,主要从事土地资源与空间信息技术研究, E-mail: changqr@ nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2012-11-18 修回日期: 2013-04-24

<sup>\*</sup>国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA102401)、"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAH29B04)和高等学校 博士学科点专项科研基金资助项目(20090204120035、20120204110013)

作者简介:陈涛,讲师,博士,主要从事农业遥感与信息技术研究,E-mail: davidlp77@ zju. edu. cn

果<sup>[4-6]</sup>。其中有研究表明,空间变异是尺度的函数<sup>[7]</sup>,即在不同尺度下,空间结构存在较大差异<sup>[8-9]</sup>。为更深入理解土壤空间异质性特点,多尺度分析成为当前研究的迫切需要<sup>[10]</sup>。

Bloschl 等<sup>[11]</sup>提出研究尺度包括采样幅度(对 应采样范围大小)、采样粒度(对应采样点分布密度 或间隔)和采样支撑(对应采样仪器测量面积大 小)。相比较而言,采样支撑在不同研究中差异较 小,而采样幅度和采样粒度则影响较大<sup>[3]</sup>。近年来 部分学者开始围绕不同采样幅度和粒度对土壤空间 变异展开分析,取得初步进展。概括有以下3种情 况:采样幅度变化<sup>[10,12]</sup>;采样粒度变化<sup>[8,13-14]</sup>;采样 幅度和粒度均发生变化<sup>[3,9,15-17]</sup>。

上述研究均有效揭示了土壤特性的多尺度变异 特征;但由于尺度分割一般较少,对其空间结构随尺 度的变化规律仍缺乏深入理解,特别是对采样粒度 变化的响应分析则更少。因此,本文以我国西北黄 土台塬区耕地土壤有机质和全氮为例,利用高密度 采样数据,通过设置最短采样间距抽取不同粒度数 据集,探讨采样粒度对土壤属性空间变异特征的影 响及其变化规律,旨在为该区土壤采样设计,碳、氮 储量估算以及尺度转换提供理论依据。

# 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省渭北旱塬东北部,黄土高原 南麓,北纬34°34′59″~35°52′08″、东经109°20′20″~110° 36′32″之间,包括蒲城县、大荔县、澄城县、合阳县和 韩城市,土地总面积约7309.21 km²,区内耕地面积 4195.73 km²。地貌由北部、西北部山地丘陵、中部 台塬和南部平原3大单元组成,地势西北高东南低, 呈阶梯状倾斜,海拔高度330~1780 m。属暖温带 半干旱气候,年均气温12.7℃,多年平均降雨量 560.4 mm,其中夏秋多雨,冬春较为干旱。受母质、 地形地貌、气候及耕作措施影响,耕地土壤以黄绵土 和塿土为主,两者面积3268.81 km²,占耕地总面积 77.91%,主要农作物为小麦、玉米。

#### 1.2 样品采集与分析

根据全国耕地地力调查与质量评价技术规程, 结合区内实际,按土壤类型、土地利用方式、地形地 貌等差异,于2008年小麦收割后,依据随机均匀布 点方式采集表层土壤样品5739个,每样点约10m<sup>2</sup> 范围内采集6~8个样点混合,四分法从中选取1kg 土样作为该点混合样品,同时利用GPS记录坐标; 土样经捡除异物、风干、研磨、过100目网筛后,装袋 备用。所有样品土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化 外加热法测定,土壤全氮含量则仅有 4 999 个样品 采用半微量凯氏定氮法测定<sup>[18]</sup>。

# 1.3 不同采样粒度数据集生成

水土科学中,采样粒度对应采样密度或采样间 隔。由于本研究为非网格随机采样,故选用采样密 度高低来表示采样粒度差异,即空间尺度变化<sup>[8]</sup>。 原始样点数据通过 dbf 格式导入 ArcGIS,利用 VBA 语言,选取坐标和最小(即采样点坐标 X、Y相加之 和最小)的样点作为起始样点,分别计算其与其他 样点间直线距离,并与指定距离(500、1000、1500、 2000、2500、3000、3500、4000、4500和5000m)进 行比较,将小于指定距离的其他样点剔除。本研究 依次通过该法分别提取 SOM 和 STN 的10个不同采 样粒度子数据集,其中以 SOM 为例,不同粒度采样 分布如图 1 所示。

各采样尺度依据文献[19]中的计算公式

$$S = \sqrt{\frac{A_0}{n}} \tag{1}$$

式中 S——尺度 A<sub>0</sub>——研究区面积 n——采样数目

本研究中,为方便叙述,使用 Scale -0, 1,2,…, 10 分别表示原始数据集和不同采样尺度数据集; SOM 和 STN 不同尺度对应的样点数如表1 所示。

# 表 1 重采样后不同间距尺度对应关系 Tab. 1 Relationship of different spacing after resampling analysis

粉捉住	指定	尺周	€/m	样点数		
奴据朱	距离/m	SOM	STN	SOM	STN	
Scale – 0		855.04	916.14	5 739	4 999	
Scale – 1	500	1 155.77	1 228. 52	3 141	2 780	
Scale - 2	1 000	1 528.45	1 586.48	1 796	1 667	
Scale - 3	1 500	1 894. 51	1 947.72	1 169	1 106	
Scale - 4	2 000	2 278. 76	2 329.78	808	773	
$\mathrm{Scale}-5$	2 500	2 648. 82	2 947.34	598	483	
$\mathrm{Scale}-6$	3 000	3 016. 85	3 362.92	461	371	
Scale - 7	3 500	3 372.02	3 816. 87	369	288	
$\mathrm{Scale}-8$	4 000	3 746.00	4 280. 42	299	229	
Scale - 9	4 500	4 129.87	4 650. 53	246	194	
Scale - 10	5 000	4 427. 89	5 042.68	214	165	

# 1.4 数据处理与分析

特异值的存在和数据非正态分布易引起空间变 异分析中变异函数的比例效应,进而导致某些结构 特征不明显<sup>[8]</sup>。采用 $\bar{x} \pm 3\delta$ 法剔除特异值( $\bar{x}$ 为原 始数据平均值, $\delta$ 为标准差);为保持原有样本量,被 剔除特异值用剔除后最大或最小值替代。特异值剔 除后经正态检验发现,各尺度 STN 数据近似符合正 态分布,而 SOM 经对数转换后偏度明显降低,也近



(d) Scale - 6 (e) Scale - 8 (f) Scale - 10

似接近正态分布,故采用 SOM 对数转换数据和 STN 原始数据进行空间变异分析。

# 1.4.1 空间自相关分析

空间自相关分析用于研究变量与其相邻变量间 空间位置关系以及属性取值特征,通过检测某位置 空间变异对邻近位置的依赖性,判断其是否存在空间 自相关性,即空间结构。最常用统计量为 Moran's *I* 指 数,其计算公式为<sup>[20]</sup>

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j \neq i}^{n} w_{ij}(x_{i} - \bar{x})(x_{j} - \bar{x})}{S^{2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \neq i}^{n} w_{ij}}$$
(2)

式中 n——研究变量样本数

 $x_i, x_j$ ——位置 i 和 j样本实测值

*S*<sup>2</sup>——方差 *w<sub>ij</sub>*——空间权重

Moran's *I* 指数取值范围为[-1,1],可用标准 化统计 *Z* 值检验其是否存在显著空间自相关。有 关权重 wii的确定及 Z 值检验参照文献[20]。

1.4.2 半方差函数及分形维数分析

利用半方差函数与取样间隔 h 可获得研究变量 的变异函数图, 拟合理论模型, 得到块金值  $C_0$ 、基台 值  $C_0 + C$  和变程 A。一般  $C_0$ 反映最小取样尺度所 引起的随机变异及实验误差;  $C_0 + C$  表示变量系统 内总变异; A 表示半方差达到基台值时的样本间距。 其中,常用块基比  $C_0/(C_0 + C)$  衡量变量的空间结 构; 一般讲, 比值小于 25% 表明变量空间相关性较 强, 比值在 25% ~75% 之间表明其具有中等空间相 关性, 比值大于 75% 则表明空间相关性较弱。半方 差计算公式<sup>[21]</sup> 为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left( Z(x_i) - Z(x_{i+h}) \right)^2 \quad (3)$$

式中  $\gamma(h)$ ——空间间隔为h的半方差

N(h)——被间隔h分割的数据点对数

 $Z(x_i)$ 、 $Z(x_{i+h})$ ——间隔h的两实测值

除半方差函数外,土壤学还常用分形维数 $F_{D}$ (Fractal dimension)度量土壤变量空间异质性特征。 作为空间随机变量的土壤特性,其变异函数的双对 数关系  $\lg\gamma(h) \propto \lg h$  在一定尺度 h 范围内存在线性 关系,进行线性回归可得到不同空间距离上回归直 线斜率H,空间随机变量分维数可作为变异性量度, 计算公式为<sup>[21]</sup>

$$F_p = 2 - H \tag{4}$$

$$H = \frac{1}{2} \lg \gamma(h) \propto \lg h \tag{5}$$

其中 H 取 0~1。当 H=0 时,分维数  $F_D$ =2,表明变 异函数为随机型,即纯块金效应,变量不存在空间相 关。 $F_D$ 取值范围(1,2],斜率 H 越大, $F_D$ 就越小,主 要反映较大尺度变异特点(即结构因子引起的系统 变异),随机变异比例少; $F_D$ 越大,则主要反映较小 尺度变异特征(人为因子引起的随机变异),结构变 异比例小<sup>[22]</sup>。

# 2 结果与分析

#### 2.1 不同粒度土壤有机质与全氮描述统计

不同粒度条件下土壤有机质与全氮含量的描述 统计结果如表 2 所示。由表 2 可知,本研究区所有 样点 SOM 的平均质量比为 14.79 g/kg,按陕西省土 壤分级标准,介于 12.00~15.00 g/kg之间,属中等 水平;而 STN 平均仅为 0.78 g/kg,按分级标准则低 于 1 g/kg,属缺氮水平。两者的平均变异系数分别 为 38.88% 和 30.77%,依变异系数划分等级<sup>[23]</sup>,均 处于 10%~100% 中等变异范围。总体来讲,该区 土壤氮素相对缺乏,耕作过程中应给予适当补充。

16 D	日南	均值	最小值	最大值	标准差		冶広	故古	
坝目	尺度	∕g•kg <sup>-1</sup>	$/g \cdot kg^{-1}$	∕g•kg <sup>-1</sup>	∕g•kg <sup>-1</sup>	受异杀数/%	偏度	峰度	
	Scale - 0	14. 79 <sup>a</sup>	0.97	32.00	5.75	38.88	0.09	2.78	
	Scale - 1	14. 31 <sup>a</sup>	0.97	30. 50	5.41	37.81	-0.13	4.34	
	Scale – 2	14. 23ª	1.70	30.80	5.56	39.07	-0.18	3.68	
	Scale - 3	13. 97 <sup>a</sup>	1.70	29.80	5.33	38.15	-0.37	3.84	
	Scale - 4	13. 82 <sup>a</sup>	1.80	28.80	5.13	37.12	-0.55	4.04	
SOM	Scale - 5	13. 94ª	1.80	30.10	5.39	38.67	- 0. 69	4.22	
	Scale - 6	13. 72 <sup>a</sup>	2.10	28.30	5.06	36.86	-0.73	4.44	
	Scale – 7	13. 78ª	1.70	29.90	5.33	38.70	- 1.02	5.35	
	Scale - 8	13. 64 <sup>a</sup>	1.70	28.30	5.02	36.80	-1.27	6.21	
	Scale - 9	13. 77 <sup>a</sup>	2.10	29.60	5.15	37.42	-0.51	4.04	
	Scale - 10	13. 67ª	1.70	28.50	4.96	36.28	-1.27	5.64	
	Scale - 0	0. 78 <sup>a</sup>	0.06	1.50	0.24	30.77	0.42	0.82	
	Scale - 1	0. 79 <sup>a</sup>	0.12	1.48	0.23	29.11	0.63	1.30	
	Scale - 2	0. 79 <sup>a</sup>	0.11	1.50	0.24	30.38	0.59	1.36	
	Scale - 3	0. 77 <sup>a</sup>	0.12	1.42	0. 22	28.57	0.41	0.72	
	Scale - 4	0. 78 <sup>a</sup>	0.15	1.48	0.24	30.77	0.89	2.25	
STN	Scale - 5	0. $56^{\rm bc}$	0.01	1.21	0. 22	39.29	0.16	0.87	
	Scale - 6	0. $55^{\rm bc}$	0.01	1.22	0.23	41.82	0.66	2.43	
	Scale – 7	0. $52^{\rm bc}$	0.01	1.15	0. 22	42.31	0.58	2.02	
	Scale - 8	$0.52^{\rm bc}$	0.01	1.21	0.23	44.23	0.60	1.98	
	Scale - 9	0. 49 <sup>bc</sup>	0.01	1.02	0. 22	44.90	0.57	3.04	
	Scale - 10	0. 48 °	0.01	1.10	0.22	45.83	0.71	3.34	

表 2 不同采样粒度土壤有机质与全氮含量描述统计 Tab. 2 Descriptive statistics of SOM and STN contents at different scales

注:a、bc、c表示不同间距尺度上土壤有机质和全氮含量均值的差异显著性(p < 0.05);SOM 的偏度、峰度为对数转换后计算所得,STN 的偏度、峰度为原始数据分析得到。

各粒度 SOM 和 STN 的平均值存在一定差异。 SOM 平均含量在 13.64~14.79 g/kg 之间,而 STN 则介于 0.48~0.79 g/kg;经 SPSS 单因素均值比较 发现,不同尺度 SOM 的均值含量差异不显著;而 STN 除 Scale - 1~Scale - 4 的平均含量无明显差异 外,与其余 6 个尺度均存在 0.05 统计水平的显著性 差异。此外,本研究还发现 SOM 和 STN 平均含量 随采样粒度增大而呈总体减小趋势。

变异系数可反映变量相对变异程度。各尺度 SOM 的变异系数较为集中,介于 36.28% ~ 39.07% 之间,而 STN 变异系数则相差较大,从 28.57% 到 45.83%。随采样粒度增大,SOM 和 STN 变异系数 的变化趋势有所不同;SOM 的变异系数基本未变, 而 STN 除在 Scale - 1 ~ Scale - 4 尺度上与原始尺度 的变异系数较为接近外(约 30% 左右),从 Scale - 5 到 Scale - 10,其变异系数则表现出明显增加趋势。 由此可以看出,不同采样粒度对 SOM 和 STN 变异 性均存在一定影响,但研究变量不同,其影响并不完 全一致。

图 2 为 SOM、STN 变异系数与尺度的散点分布 图。由图可看出,SOM 变异系数随采样粒度增大而 保持相对稳定,略有减小,两者间呈显著负相关线性 关系(α=0.05),说明 SOM 变异性在本研究区内较 为一致,随样点减少,采样间距增大,样本数据略趋 于集中。而 STN 则明显不同,其变异系数与尺度间 表现出显著正相关(α=0.05),随采样粒度增大其 变异性增强,STN 含量呈离散趋势,这与潘瑜春 等<sup>[24]</sup>、王金国等<sup>[25]</sup>研究结果类似,可能与区内氮肥 施用、耕作措施不同导致区内变异性较大有关。



土壤有机质和全氮的描述统计结果仅能反映样 本数据随尺度变化的总体情况,而不能有效揭示空 间尺度结构性与随机性的变化规律。因此,需进一 步采用空间统计进行土壤有机质和全氮的空间自相 关及变异结构分析。

#### 2.2 不同粒度土壤有机质与全氮的空间自相关分析

表 3 为不同粒度 SOM 和 STN 的全局 Moran's *I* 统计结果。由表 3 可知, SOM 的 Moran's *I* 值介于 0.28~0.58 之间, 经标准化统计, 其在各尺度均表 现出 0.01 显著的空间聚集性。STN 的 Moran's *I* 值 介于 0.08~0.32 之间, 其中 Scale - 8 尺度 的

Moran's I 最小, 仅为 0. 08, 未达到统计显著水平; 而 Scale - 9 和 Scale - 10 也仅表现出 0. 05 统计显著 性, 其余尺度 STN 的 Moran's I 值均呈极显著空间 聚集。此外, 各尺度 SOM 的 Moran's I 值相对 STN 而言均较大, 说明在相应尺度下, SOM 在研究区内 存在更强的空间自相关性, 其空间变异相对较小。

表 3 不同采样粒度 SOM 和 STN 的 Moran's *I*统计 Tab. 3 Moran's *I* values of SOM and STN at different scales

项目	Scale – 0	Scale – 1	Scale – 2	Scale – 3	Scale – 4	Scale – 5	Scale – 6	Scale – 7	Scale – 8	Scale – 9	Scale – 10
SOM	0.58 * *	0.52 * *	0. 49 * *	0.44 * *	0.46 * *	0. 43 * *	0.45 * *	0. 43 * *	0.34 * *	0. 28 * *	0.33 * *
STN	0.31 * *	0.32 * *	0. 30 * *	0. 28 * *	0.32 * *	0.17 * *	0.16 * *	0.17 * *	0.08	0.14 *	0.12 *

注:\*为0.05统计显著,\*\*为0.01统计显著。

图 3 为 SOM 和 STN 的 Moran's *I* 指数与尺度散 点分布图。由图可看出,SOM 和 STN 的 Moran's *I* 值均随粒度增大呈减小趋势,且 Moran's *I*与尺度 间存在显著线性关系(α=0.05),说明在本研究中, 随采样点减少,采样间距增大,SOM 和 STN 的空间 自相关性呈减小变化,其空间聚集性变弱。





# 2.3 不同粒度土壤有机质与全氮半方差函数与分 形维数分析

表4为不同尺度下 SOM 和 STN 的半方差函数 及分形维数统计结果。在不同采样粒度下,SOM 和 STN 的理论模型均符合指数模型,其决定系数最小 为0.823,最大为0.973,经 F 检验均达到0.05 统计 显著,说明模型拟合精度较高,能较好反映不同尺度 耕地 SOM 和 STN 的空间结构特征。

由表4可看出,SOM和STN的C<sub>0</sub>随粒度增大总体呈增加趋势,说明在本研究中,SOM和STN随采样点减少,采样间距增大,更多小尺度的变异被认为是随机变异。

此外,还发现 SOM 的块基比  $C_0/(C_0 + C)$  在原 始尺度下最小, 仅为 11.08%, 具有较强空间结构 性, 而在尺度 Scale - 4 下 SOM 达到最大, 为 31.61%,表现出中等空间相关性;相比较而言, STN 块基比均有所提高,最小为原始尺度的 21.93%, 最 大为 Scale - 6 尺度下的 49.85%;由此可看出,SOM 和 STN 在原始采样尺度下块基比均最小,表现出较强空间相关性,随粒度增大,其随机因素所引起的空间变异逐渐增多,当总变异变化不大时,导致其结构变异比重减少。

由各粒度块基比与尺度的散点图(图4)可看 出,SOM和STN的块基比随采样间距的变化规律较 为一致,并非简单线性关系,而表现出先增大后略有 减小的倒U型二次多项式变化趋势,这说明其空间 结构随采样粒度增大,先减弱后略有增强。出现此 变化规律的原因可能与土壤类型的空间分布有密切 关系。在本研究中,共有9种土壤类型犬牙交错分 布,在较小尺度下,土壤类型间的差异可能是引起 SOM和STN变异的主导因素,当随采样间距增大 时,土壤类型变异越加明显,导致研究变量随机性增 强;而随采样间距增大到一定程度时,小于采样尺度 的土壤类型差异逐渐被更大尺度的主导因素所替代 或掩盖(如气候条件),从而使 SOM、STN 结构性又 缓慢增强,有关此结果的原因还需进一步探讨。

除空间自相关和变异函数外,不同粒度 SOM 和 STN 的空间结构特点还可用分形维数  $F_p$ 来定量描述。由表4 可知,SOM 在不同尺度上  $F_p$ 值主要介于 1.829~1.916,原始尺度下分维数最小,在该尺度下 主要反映较大尺度的变异特征(即结构因子引起的 系统变异),随机变异比例较少;随采样粒度增大, 其  $F_p$ 值呈现增大变化,尤其是 Scale - 8 和 Scale - 9 两尺度的分形维数最大,均超过了 1.90,表明该两 尺度 SOM 含量的随机变异性最强。相比较而言,不 同尺度的 STN 分形维数较 SOM 高,最小为 Scale -10 尺度上的 1.889,最大为 Scale - 5 的 1.930,说明 在整个研究区,SOM 表现出更多结构性变异,而 STN 的随机变异则占比重较多。这一点与上述 SOM 和 STN 的块基比研究结果相类似。

项目	尺度	拟合模型	$C_0$	$C_0 + C$	$C_0 / (C_0 + C)$ /%	变程 /m	决定系数 R <sup>2</sup>	F	$F_{D}$
	Scale - 0	Е	0.0460	0.4150	11.08	633 000	0. 939	169.33	1.829
	Scale – 1	Е	0. 053 8	0.3386	15.89	633 000	0.967	322.33	1.856
	Scale - 2	Е	0.0579	0.3678	15.74	633 000	0.971	368.31	1.854
	Scale - 3	Е	0.0658	0.3416	19.26	633 000	0.964	294.56	1.876
	Scale - 4	Е	0.0662	0.2094	31.61	305 700	0.965	303.29	1.880
SOM	$\mathrm{Scale}-5$	Е	0.0771	0.3292	23.42	572 400	0.953	223.04	1.886
	Scale - 6	Е	0.0637	0.2564	24.84	428 400	0.973	396.41	1.874
	Scale - 7	Е	0. 089 5	0.3940	22.72	633 000	0.936	160.88	1.891
	$\mathrm{Scale}-8$	Е	0.0932	0.3104	30.03	633 000	0. 939	169.33	1.916
	Scale - 9	Е	0. 079 8	0.2886	27.65	633 000	0.823	51.15	1.912
	Scale - 10	Е	0.0795	0.3880	20.49	633 000	0.918	123.15	1.881
	Scale - 0	Е	0.0118	0.0538	21.93	633 000	0.877	78.43	1.901
	Scale – 1	Е	0.0104	0.0457	22.76	633 000	0. 948	192.70	1.897
	Scale - 2	Е	0.0115	0.0461	24.95	633 000	0.937	163.60	1.905
	Scale - 3	Е	0.0113	0.0397	28.46	633 000	0.964	267.78	1.916
	Scale - 4	Е	0.0108	0.0375	28.80	500 700	0.971	334.83	1.901
STN	$\mathrm{Scale}-5$	Е	0.0161	0.0471	34.18	633 000	0.904	103.58	1.930
	Scale - 6	Е	0.0171	0.0343	49.85	270 300	0.949	204.69	1.928
	Scale - 7	Е	0.0171	0.0392	43.62	353 700	0.972	381.86	1.922
	$\mathrm{Scale}-8$	Е	0.0186	0.0565	32.92	633 000	0.834	55.27	1.928
	Scale - 9	Е	0.0154	0.0429	35.90	342 600	0.932	150.77	1.898
	Scale - 10	Е	0.0153	0.0672	22.77	633 000	0.944	185.43	1.889

不同粒度 SOM 和 STN 的半方差函数及分形维数 Tab. 4 Semi-variogram and fractal dimension of SOM and STN at different scales

表 4

注:在进行半方差函数拟合及分形维数计算时,不同尺度 SOM 最大步长距离 76 870 m,间隔距离 6 000 m;不同尺度 STN 的最大步长距离 76 598 m, 间隔距离 6 100 m; 拟合模型 E 为指数模型。



SOM, STN and scale

由各尺度分形维数与尺度间的散点图(图5)可 以看出,SOM 和 STN 的分维数随采样粒度增大,也 表现出先增后减的倒 U 型变化趋势,其空间变异性 先减弱后略有增强。

由上述分析可看出,在研究土壤属性空间变异 时,不仅要考虑采样幅度大小的影响,而且其采样粒 度变化对其空间结构的表征也同样存在很大影响, 其影响并非简单的线性关系;此外,空间自相关分析 仅能显现研究变量空间集聚性随尺度的变化概况, 而其空间随机变异与结构变异的消长并未完全揭 示,半方差函数及分形维数则能较好揭示其空间结 构随粒度的变化趋势,三者结合共同刻画土壤属性



SOM, STN and scale

空间变异对采样粒度的响应则较为理想。

#### 2.4 土壤有机质与全氮的空间分布

SOM、STN 经 Kriging 插值得到本区耕地 SOM、 STN 的空间分布图及面积统计结果(图 6 和表 5), 其均方根标准预测误差(RMSSE)分别为 0.991、 1.055,接近于1,预测值与实测值相关系数分别为 0.729<sup>\*\*</sup>和 0.495<sup>\*\*</sup> (α = 0.01),表明 SOM 和 STN 的预测精度较高。由图6可看出,耕地 SOM 和 STN 的空间分布具有很大相似性,由北向南整体呈递减 变化;通过与经、纬度坐标相关性分析可发现,SOM、 STN 均与纬度呈显著正相关(相关系数分别为 0.469\*\*和 0.310\*\*),即随纬度增高,耕地 SOM 和 STN 也随之增加。导致此分布的原因可能是随纬度 增大温度相应降低,北部较低的温度对土壤微生物 活动有较大限制,有利于 SOM 和 STN 积累;同时, 还发现该区地势由北向南逐渐降低,较高海拔区为 地势平坦的台塬区,也是传统农业耕作区,长期的培 肥与改良等措施,有利于 SOM 和 STN 积累。南部 大荔县虽地处平原,灌溉方便,但由于其温度相对较 高,耕作强度大,长期利用对土壤养分的消耗也同样 较大;此外,分布较广的风沙土也是导致平原区 SOM 和 STN 较低的重要原因。



图 6 土壤有机质与全氮空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of SOM and STN

# 表 5 不同等级 SOM 和 STN 面积及比例统计 Tab.5 Area and statistic result of SOM and STN

		分级标准/g·kg <sup>-1</sup>								
		< 8.0	8.0 ~10.0	10.0 ~12.0	12.0 ~15.0	15.0 ~20.0	20.0 ~ 30.0	> 30.0		
	面积/km <sup>2</sup>	86. 53	390. 98	1 258.02	2 019. 29	323.05	99.74	18.12		
SOM	比例/%	2.06	9.32	29.98	48.13	7.70	2.38	0.43		
					分级标准/g·kg <sup>-1</sup>	·级标准/g·kg <sup>-1</sup>				
		< 0.50	0.50	0.50~0.75		1.00 ~	1. 25	1.25 ~1.50		
	面积/km <sup>2</sup>	106.68	2 (	071.31	1 595. 52	53.8	5	0.42		
STN	比例/%	2.79	54.11		41.68	1.4	1	0.01		

耕地 SOM 含量分布较为集中,主要介于10.0~ 15.0 g/kg之间,面积达到3277.31 km<sup>2</sup>,占所有耕地 78.11%;而大于 15.0 g/kg 的耕地面积仅占 10.51%,不足10.0 g/kg 的耕地面积有477.51 km<sup>2</sup>, 总体上耕地 SOM 含量中等偏下。耕地 STN 含量也 较为集中,主要介于0.50~1.00 g/kg之间,其他等 级的耕地不足5%,可见该区耕地土壤氮含量总体 偏低,属低等级水平,在耕作过程中应根据需要适当 增加氮素补充。

# 3 结论

(1)研究区耕地土壤有机质和全氮的平均质量 比分别为 14.79 g/kg 和 0.78 g/kg,其变异系数为 38.88%和 30.77%,属中等强度变异。随采样粒度 增大,SOM和 STN 变异系数的变化趋势有所不同, SOM的变异系数基本未变,而 STN 则总体表现出增 加趋势。

(2)随采样粒度增加,SOM 和 STN 的空间自相 关性呈减小变化,空间聚集性减弱;而随机因素所引 起的空间变异性逐渐增强,导致其结构变异比重减 少。SOM 和 STN 的空间变异性随粒度的变化并非 简单线性关系,而是先增后减的倒 U 型变化趋势。

(3)由于地形、土壤、温度、耕作强度等差异,导 致本区耕地 SOM 和 STN 空间分布呈北高南低,SOM 含量整体中等偏下,而 STN 含量则较低,耕作时应 适当增加氮素补充。

#### 参考文献

<sup>1</sup> 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

<sup>2</sup> 李文芳,杨世俊,文池夫,等.土壤有机质的环境效应[J].环境科学动态,2004,29(4):31~33.

Li Wenfang, Yang Shijun, Wen Chifu, et al. Soil organic matter environment effect[J]. Environmental Science Trends, 2004, 29(4): 31~33. (in Chinese)

- 3 聂卫波,费良军,马孝义.区域尺度土壤入渗参数空间变异性规律研究[J].农业机械学报,2011,42(7):102~108. Nie Weibo, Fei Liangjun, Ma Xiaoyi. Spatial variability of infiltration parameters at the region scales [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 102~108. (in Chinese)
- 4 张晓光,黄标,张贝尔,等. 盐渍土平原区玉米产量空间变异与地形关系研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 51~57. Zhang Xiaoguang, Huang Biao, Zhang Beier, et al. Spatial variability of maize yield and relations to terrain attributes in salinized plain region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 51~57. (in Chinese)
- 5 Chuai X W, Huang X J, Wang W J, et al. Spatial variability of soil organic carbon and related factors in Jiangsu province, China [J]. Pedosphere, 2012, 22(3): 404 ~ 414.
- 6 Sumfleth K, Duttmann R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators [J]. Ecological Indicators, 2008, 8(5): 485 ~ 501.
- 7 Antonio P M. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1 473 ~ 1 481.
- 8 霍霄妮,李红,张微微,等.北京耕作土壤重金属多尺度空间结构[J].农业工程学报,2009,25(3):223~229. Huo Xiaoni, Li Hong, Zhang Weiwei, et al. Multi-scale spatial structure of heavy metals in Beijing cultivated soils [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3):223~229. (in Chinese)
- 9 杨奇勇,杨劲松,刘广明. 土壤速效养分空间变异的尺度效应[J]. 应用生态学报,2011,22(2):431~436. Yang Qiyong, Yang Jingsong, Liu Guangming. Scale-dependency of spatial variability of soil available nutrients [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2):431~436. (in Chinese)
- 10 王丹丹,岳书平,林芬芳,等.东北地区旱地土壤全氮空间变异性对幅度扩展的响应[J].土壤学报,2012,49(4): 625~635.
- Wang Dandan, Yue Shuping, Lin Fenfang, et al. Response of spatial variability of soil total nitrogen to expansion of uplands in scale in northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 625~635. (in Chinese)
- 11 Bloschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrology model—a review [J]. Hydrological Process, 1995, 9(3~4): 251~290.
- 12 李从娟,李彦,马键. 古尔班通古特沙漠土壤化学性质空间异质性的尺度特征[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 302~310. Li Congjuan, Li Yan, Ma Jian. Scale characteristics of spatial heterogeneity of soil chemical properties in Gurbantunggut desert [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(2): 302~310. (in Chinese)
- 13 Western A W, Bloschl G. On the spatial scaling of soil moisture [J]. Journal of Hydrology, 1999, 217(3~4): 203~224.
- 14 Sahrawat K L, Regoa T J, Wania S P, et al. Stretching soil sampling to watershed: evaluation of soil-test parameters in a semiarid tropical watershed [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, 39(19 ~ 20): 2 950 ~ 2 960.
- 15 雷咏雯,危常州,李俊华,等.不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究[J].土壤,2004,36(4):376~381. Lei Yongwen, Wei Changzhou, Li Junhua, et al. Characters of soil nutrient spatial variability in different scale[J]. Soil, 2004, 36(4):376~381. (in Chinese)
- 16 张世熔,孙波,赵其国,等.南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征[J].土壤学报,2007,44(5):885~892. Zhang Shirong, Sun Bo, Zhao Qiguo, et al. Distribution characteristics of soil nitrogen at multi-scales in hilly region in south China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5):885~892. (in Chinese)
- 17 盛建东,肖华,武红旗,等.不同取样间距农田土壤全量养分空间变异特征研究[J].土壤通报,2006,37(6):1062~1065. Sheng Jiandong, Xiao Hua, Wu Hongqi, et al. Spatial variability of total nutrients in arable soil as affected by different sampling distances[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(6): 1062~1065. (in Chinese)
- 18 于天仁, 王振权. 土壤分析化学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- 19 Lei G, Shao M A. The interpolation accuracy for seven soil properties at various sampling scales on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(2):128 ~ 142.
- 20 陈云坪,王秀,马伟,等.小麦多年产量空间变异与空间关联分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 180~184. Chen Yunping, Wang Xiu, Ma Wei, et al. Spatial autocorrelation analysis of wheat yield over five years[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 180~184. (in Chinese)
- 21 Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives [J]. Geoderma, 1999, 89(1~2): 1~45.
- 22 张法升,刘作新. 分形理论及其在土壤空间变异研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1 351~1 358. Zhang Fasheng, Liu Zuoxin. Fractal theory and its application in the analysis of soil spatial variability: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1 351~1 358. (in Chinese)
- 23 Eghball B, Hergert G W, Lesoing G W, et al. Fractal analysis of spatial and temporal variability [J]. Geoderma, 1999, 88(3 ~ 4): 349 ~ 362.
- 24 潘瑜春,刘巧芹,阎波杰,等.采样尺度对土壤养分空间变异分析的影响[J].土壤通报,2010,41(2):257~262. Pan Yuchun, Liu Qiaoqin, Yan Bojie, et al. Effects of sampling scale on soil nutrition spatial variability analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science,2010,41(2):257~262. (in Chinese)
- 25 王金国,周卫军,王彬武,等.县域尺度土壤样点密度与插值精度研究[J].湖南农业科学,2011(21):27~30.
  Wang Jinguo, Zhou Weijun, Wang Binwu, et al. Soil sample density and interpolation accuracy on county scale:a case study on soil pH[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(21):27~30. (in Chinese)